

Використання алгоритмів СМЕ та FCME у задачі детектування кроків людини

Using CME and FCME Algorithms for the Task of Detecting Human Steps

Євген Вістизенко¹
Yevhen Vistyzenko

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37, Prospect Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

DOI: [10.22178/pos.73-2](https://doi.org/10.22178/pos.73-2)

LCC Subject Category: [T1-995](#)

Received 20.07.2021
Accepted 26.08.2021
Published online 31.08.2021

Corresponding Author:
vev18@ukr.net

© 2021 The Author. This article is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](#) 

Анотація. Наразі світові тенденції розвитку техніки охорони периметрів призводять до загальної мініатюризації пристроїв та систем та підвищення їх автономності. Основним трендом в розвитку даних систем є максимальна обробка і класифікація сигналів вбудованими засобами. У статті наведені результати дослідження по можливості застосування сліпих алгоритмів розрахунку рівня спрацювання порогового детектора СМЕ та FCME, у задачі детектування кроків людини у сейсмічних детекторах охорони периметру з використанням малопотужних обчислювальних модулів. Алгоритми були перевірені на реальних даних записаних в ході експериментів. В результаті застосування алгоритмів для огинаючої сейсмічного сигналу кроки людини вірогідності хибних спрацювань для алгоритмів СМЕ та FCME, склали 23 % та 10 % відповідно. Нейтралізація тренду сигналу дозволила отримати значення хибних спрацювань в 16 % для алгоритму СМЕ та 7 % для алгоритму FCME. А нормалізація амплітуди сигналів в межах одного інтервалу аналізу дозволила отримати вірогідність хибних спрацювань на рівні 0 % для обох алгоритмів. Отримані результати дають повну інформацію при виборі типу алгоритму в залежності від вхідних даних. В задачі детектування сейсмічних даних автономним сенсором, найбільш доцільним є використання алгоритму СМЕ з попереднім нормуванням амплітуди сигналу, через меншу обчислювальну складність.

Ключові слова: СМЕ; FCME; сейсмічні сигнали; автономні сейсмічні давачі; пороговий детектор.

Abstract. Currently, global trends in the development of perimeter security technology lead to the general miniaturization of devices and systems and the increase of their autonomy. The primary trend in developing these systems is the maximum processing and classification of signals by built-in tools. The article presents the study results on the possibility of using blind algorithms to calculate the level of operation of the threshold detector CME and FCME in detecting human steps in seismic perimeter security detectors using low-power computing modules. The algorithms were tested on actual data recorded during the experiments. As a result of applying algorithms for the seismic signal envelope, the human steps of the probability of false positives for the CME and FCME algorithms were 23% and 10%, respectively. Neutralizing the signal trend allowed obtaining values of false alarms of 16% for the CME algorithm and 7% for the FCME algorithm, and normalization of the signal amplitude within one analysis interval allowed obtaining the probability of false alarms at 0% for both algorithms. The obtained results give complete information when choosing the type of algorithm depending on the input data. In detecting seismic data by an autonomous sensor, it is most appropriate to use the SME algorithm with pre-normalization of the signal amplitude due to less computational complexity.

Keywords: CME; FCME; seismic signals; autonomous seismic sensors; threshold detector.

ВСТУП

Сейсмічні системи наразі є одними з найефективніших систем охорони периметрів в першу чергу через їх повну невидимість для порушників. Переміщення порушника кроком чи бігом породжує періодичну послідовність ударних впливів на ґрунт при контакті ноги з поверхнею. Цей ударний вплив породжує цілий ансамбль сейсмічних хвиль. Виділяють чотири основні типи сейсмічних хвиль: повздовжні хвилі (Р – хвилі), поперечні хвилі (S – хвилі), хвилі Релея, хвилі Лява. В задачі детектування переміщення порушника найбільший інтерес викликають хвилі Релея, адже в них переноситься 67 % енергії збудження, в той час коли повздовжні хвилі переносять 7 %, а поперечні – 26 % [1]. До того ж хвилі Релея належать до поверхневих хвиль що розповсюджуються біля поверхні і мають еліптичну траєкторію руху часток з домінуванням вертикальної компоненти.

Домінування вертикальної компоненти дозволяє для реєстрації збуджень використовувати однокомпонентні датчі сейсмічних хвиль. Найбільшого поширення отримали

індуктивні датчі сейсмічного сигналу (геофони).

Геофон – це пристрій що приймає механічні коливання ґрунту та здійснює їх перетворення на електричні. Для перетворення механічних коливань в електричні використовується принцип електромагнітної індукції, у якості маси підвішеною на підвісі, використовується циліндрична котушка. Усередині котушки знаходиться, прикріплений до корпусу, постійний магніт, який створює радіальне магнітне поле. При зміщенні ґрунту корпус геофона разом з магнітом рухається разом з ним в той час як котушка залишається нерухомою, в результаті чого в котушці наводиться електричний струм [2].

Типова модель геофона дозволяє записувати коливання ґрунту в діапазоні від 10 до 1000 Гц, згідно з експериментальними даними для запису кроків людини достатньо смуги в 250 Гц. Типова сейсмограма кроків людини наведена на рисунку 1, записана при русі людини по прямій на відстані 30 метрів від датча.



а)



б)

Рисунок 1

а) зовнішній вигляд датча з підсилювачем у зборі; б) проведення експерименту на полігоні 1

Для запису сейсмічних сигналів був розроблений стенд з програмним забезпеченням розробленим в середовищі MATLAB. В якості давача застосовувався геофон GS-ONE в комплекті зі схемою підсилювача та фільтра низької частоти налаштованим на частоту зрізу в 250 Гц. Давач з підсилювачем та фільтром був змонтований у корпус надрукований з ABS пластику (Рисунок 1а) та з'єднаний кабелем з платою АЦП.

Для запису сигналів було обрано два полігони в околицях Києва що істотно відрізнялися по своїй шумовій обстановці та складу ґрунту.

Полігон 1: острів на Дніпрі, без промисловості і близьких ліній електропередачі чи інших джерел електромагнітних та акустичних завад, повна відсутність транспорту та людей, окрім тих хто приймали участь в експерименті.

нті дозволило отримати еталонні записи сигналів. Ґрунт піщаний, середньої щільності.

Полігон 2: околиці міста, відкрите поле з постійним сильним вітром, на відстані близько 300 метрів розташована завантажена 4х смугова траса з постійним проходженням легкових і вантажних автомобілів. З точки зору шумової обстановки вкрай несприятливе місце, яке в свою чергу дозволило записати велику кількість шумових сигналів та корисних сигналів з невеликим відношенням сигнал/шум. Ґрунт суглинков, великої щільності.

Усього було зроблено близько 60 записів (10 годин) шумових сигналів, в різний час доби. Близько 90 записів кроків людини що відповідає 2 м годинам, та близько 10 проїздів автомобіля біля давача. Нижче будуть наведені типові сейсмограми отримані в ході експериментів.

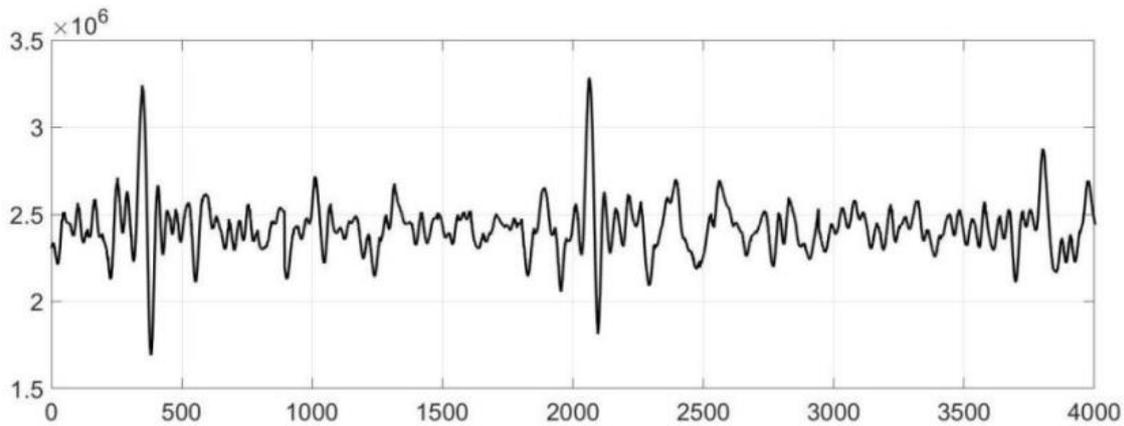


Рисунок 2 – Сейсмограма кроків людини

Як видно з Рисунку 2 сейсмограма кроків людини носить імпульсний характер і мають періодичну структуру викликану циклічністю руху людини. В залежності від швидкості руху людини частота повторення імпульсів буде пропорційно змінюватися. Для сейсмічних систем охорони визначають необхідність виявлення людини при швидкості 0,5–6 м/с. Внутрішня структура імпульсів має випадковий характер розподіл якого залежить від характеристик ґрунту та давача.

Складний багатопроменевий характер розповсюдження сейсмічних хвиль а також можливість їх розповсюдження на великі відстані призводить до суперпозиції великої кількості коливань у місці прийому. Результатом цієї суперпозиції є сейсмічний фон (сейсмічний шум). До джерел сейсмічного шуму належать

промислові зони, траси з великою інтенсивністю руху та залізничні колії а також дерева та стовпи під час впливу вітру, тощо. На Рисунку 3 наведений запис сейсмічного фону на відстані 200 метрів від траси з активним рухом автомобільного транспорту.

Наразі світові тенденції розвитку техніки призводять до загальної мініатюризації пристроїв та систем та підвищення їх автономності. Це стосується як часу роботи без необхідності підзарядки чи заміни елементів живлення, так і можливості пристроєм виконувати свої функції без додаткових обчислювальних пристроїв. Ці тенденції не минули і сейсмічні системи охорони периметру. Основним трендом в розвитку даних систем є максимальна обробка і класифікація сигналів вбудованими засобами.

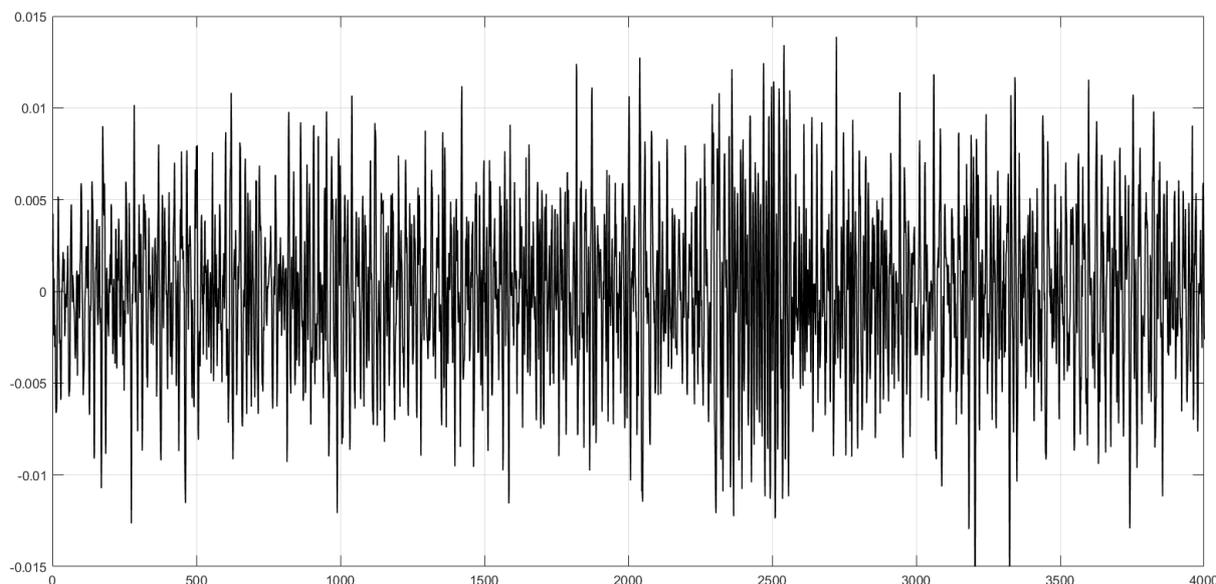


Рисунок 3 – Сейсмограма сейсмічного фону

На Рисунку 4 наведено типовий алгоритм роботи автономного сейсмічного давача хвиль з можливістю класифікації типу цілі. На першому етапі відбувається запис сигналу з давача сейсмічних хвиль. Отриманні відліки подаються на пороговий детектор задля отримання інформації про наявність активності в даний момент часу. В разі якщо виявлено що

в даному наборі відліків присутня активність, з даного набору отримуються коефіцієнти перетворення Фур'є. З них обчислюється вектор ознак згідно з яким класифікатор відносить даний набір відліків до одного з класів цілей. Після класифікації відбувається сигналізація про результат.



Рисунок 4 – Типовий алгоритм роботи сейсмічного давача

Як було зазначено вище сейсмограма кроків людини на відміну від сейсмограми шуму носить імпульсний характер що дозволяє виявляти активність за допомогою порогових детекторів. В літературі наведена достатньо велика кількість алгоритмів для розрахунку порогового значення детектора, зокрема для задачі виявлення сейсмічної активності [3, 4]. Проте ці алгоритми вимагають мати оцінку шуму для розрахунку порогового значення, що в свою чергу призводить до необхідності

постійного обчислення порогового значення при зміні навколишніх умов.

Для усунення даного недоліку можна використовувати алгоритми розрахунку що не потребують початкової інформації про сейсмічний шум в даний момент часу. До таких алгоритмів належать алгоритми SME або FCME.

Метою дослідження є перевірка можливості застосування алгоритмів SME та FCME у задачі детектування кроків в сейсмічних систе-

мах охорони периметрів. Аналіз їх ефективності та можливі шляхи по оптимізації їх роботи з урахуванням наведеної вище специфіки.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Алгоритм СМЕ [5, 6, 7], був запропонований для придушення імпульсних перешкод у часовій області, згодом було виявлено він може працювати для обчислення порогового рівня як в часовій так і в частотній області.

Алгоритм СМЕ є сліпим і не залежить від методів модуляції, типів сигналів та їх кількості. Єдиними вимогами є те, що подія яку необхідно виявити не може тривати весь час аналізу і має перевищувати рівень шуму.

Алгоритм СМЕ

Розглянемо алгоритм обчислення порогового значення для роботи детектора:

1. Спочатку необхідно обчислити початкове значення коефіцієнту ТСМЕ (позначення взято з оригінальної роботи [6]):

$$T_{CME} = -\ln P_{FA} \text{ - для розподілу } \chi^2$$

$$T_{CME} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{-\ln P_{FA}} \text{ - для розподілу Релея,}$$

де P_{FA} - це значення задає необхідну вірогідність помилкового спрацювання алгоритму.

2. Розраховуємо значення:

$$\vartheta = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |x_i|^2 \text{ - для розподілу } \chi^2,$$

$$\vartheta = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |x_i| \text{ - для розподілу Релея.}$$

3. Обраховуємо порогове значення:

$$T_h = T_{CME} * \vartheta$$

4. З масиву спостережень (відліків АЦП) видаляються значення що перевищують розрахований пороговий рівень (T_h):

Видалити значення що задовольняють наступне правило:

$$|x_i|^2 > T_h \quad \text{- для розподілу } \chi^2$$

$$|x_i| > T_h \quad \text{- для розподілу Релея}$$

5. Провести розрахунки згідно з пунктами 2–4.

6. Якщо під час виконання пункту 4 з масиву спостережень не було видалено жодного значення, розрахунки порогового рівня припиняються. Даний рівень приймається для подальшої роботи.

Алгоритм FCME

Алгоритм FCME є удосконаленою версією алгоритму СМЕ основною відмінністю якого є те що для початкових розрахунків приймається лише невелика частина найменших відліків, це дозволяє отримати більш точні порогові значення.

Розглянемо алгоритм FCME для обчислення порогового значення для роботи детектора:

1. Спочатку необхідно обчислити початкове значення коефіцієнту ТСМЕ:

$$T_{CME} = -\ln P_{FA} \text{ - для розподілу } \chi^2$$

$$T_{CME} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{-\ln P_{FA}} \text{ - для розподілу Релея, де}$$

P_{FA} - це значення задає необхідну вірогідність помилкового спрацювання алгоритму.

2. Необхідне сортування масиву спостережень за рівнем енергії від найменшого до найбільшого.

3. З відсортованого масиву значень відбирається певний відсоток найменших значень, з яких формується масив значень x . Зазвичай кількість цих значень лежить в проміжку 10-25% від розміру масиву спостережень, але може відрізнятися в залежності від типу сигналу.

4. Розраховуємо значення:

$$\vartheta = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |x_i|^2 \text{ - для розподілу } \chi^2$$

$$\vartheta = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |x_i| \text{ - для розподілу Релея}$$

5. Обраховуємо порогове значення:

$$T_h = T_{CME} * \vartheta$$

6. До масиву спостережень (відліків АЦП) додаються N значень якщо розрахований поро-

говий рівень (T_h) перевищує усі відліки у вибірці:

Додати до масиву N значень якщо:

$$|x_i|^2 < T_h - \text{для розподілу } \chi^2$$

$$|x_i| < T_h - \text{для розподілу Релея}$$

7. Провести розрахунки згідно з пунктами 2-4.

8. Якщо під час виконання пункту 6 до масиву спостережень не було додано жодного значення, розрахунки порогового рівня припиняються. Даний рівень приймається для подальшої роботи.

На основі статистичного аналізу сигналів знятих в ході експериментів було визначено що розподіл сейсмічних сигналів найбільш

наближений до розподілу Релея. В подальших розрахунках будуть використовуватися відповідні формули.

Для обчислення порогового значення будуть використовуватися відрізки сигналу по 3 секунди. Загальна тривалість тестового запису дорівнює 90 секунд, за які людина пройшла 91 метр. З отриманих трьох секундних відрізків за допомогою перетворення Гілберта було отримано огинаючу сейсмічного сигналу яка і приймається як вхідні данні для аналізу. На Рисунку 5 наведена огинаюча одного із 3х секундних кадрів з кроками людини що аналізувалися в рамках даної статті, частина цього кадру наведена на Рисунку 2. Також в аналізі брали участь кадри з сейсмічними шумами для яких застосовувалися така ж сама попередня обробка.

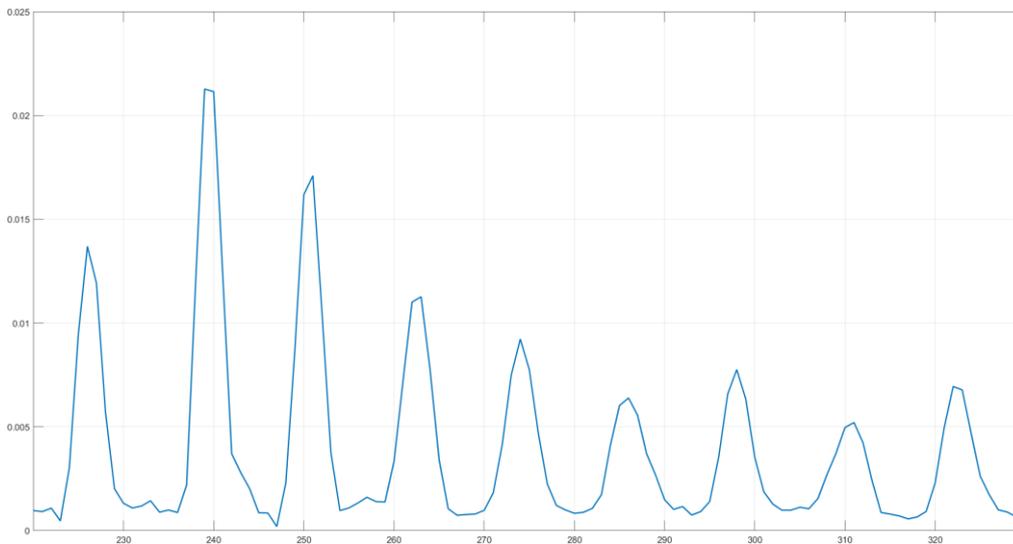


Рисунок 5 – Огинаюча сейсмічного сигналу кроку людини

Обчислення порогового значення

На кожному з інтервалів було обчислено свій власний пороговий рівень, це необхідно через можливість значної зміни рівня сейсмічного шуму на протязі дуже короткого відрізка часу. Наприклад порив вітру може спричинити локальне підвищення рівня шуму на час близько 10–20 секунд. Тому необхідно розраховувати порогове значення не рідше ніж раз на 5 секунд. В свою чергу мінімальне значення часу на протязі якого можна розраховувати значення порогоу не може бути менше ніж тривалість події яку ми хочемо виявити. При роботі з огинаючими сейсмічного сигналу від

кроку людини це значення не повинне бути меншим за 0,7 секунд.

Значення P_{FA} вибирається довільним чином, при виборі цього значення бажано орієнтуватися на необхідну величину хибних спрацювань особливо при умові відсутності корисного сигналу на вході алгоритму.

У Таблиці 1 наведено результати роботи алгоритму порогового детектора при порозі спрацювання обчисленого за допомогою розглянутих алгоритмів. Критерієм для вибору значення P_{FA} було отримання 100% правильних спрацювань на сигналі з кроками людини. В той же час при цих значеннях було отримано вірогідність хибних спрацювань на

шумових сигналах для алгоритмів СМЕ та FCME 23% і 10% відповідно.

Таблиця 1

	СМЕ	FCME
Відсоток правильних спрацювань	100 %	100 %
Вірогідність хибних спрацювань	23 %	10 %
Значення P_{FA}	0,121	0,039

Отриманні значення вірогідності хибних спрацювань в 23% для порогового детектора є завеликими і не можуть задовільнити більшу частину практичних задач.

Розглянемо можливості по мінімізації вірогідності хибних спрацювань. На Рисунку 6 синім кольором зображено запис огинаючої сейсмічного сигналу тривалістю в 90 секунд, червоним кольором зображено тренд сигналу. А помаранчевим показано зміну амплітуди в сигналі що аналізується.

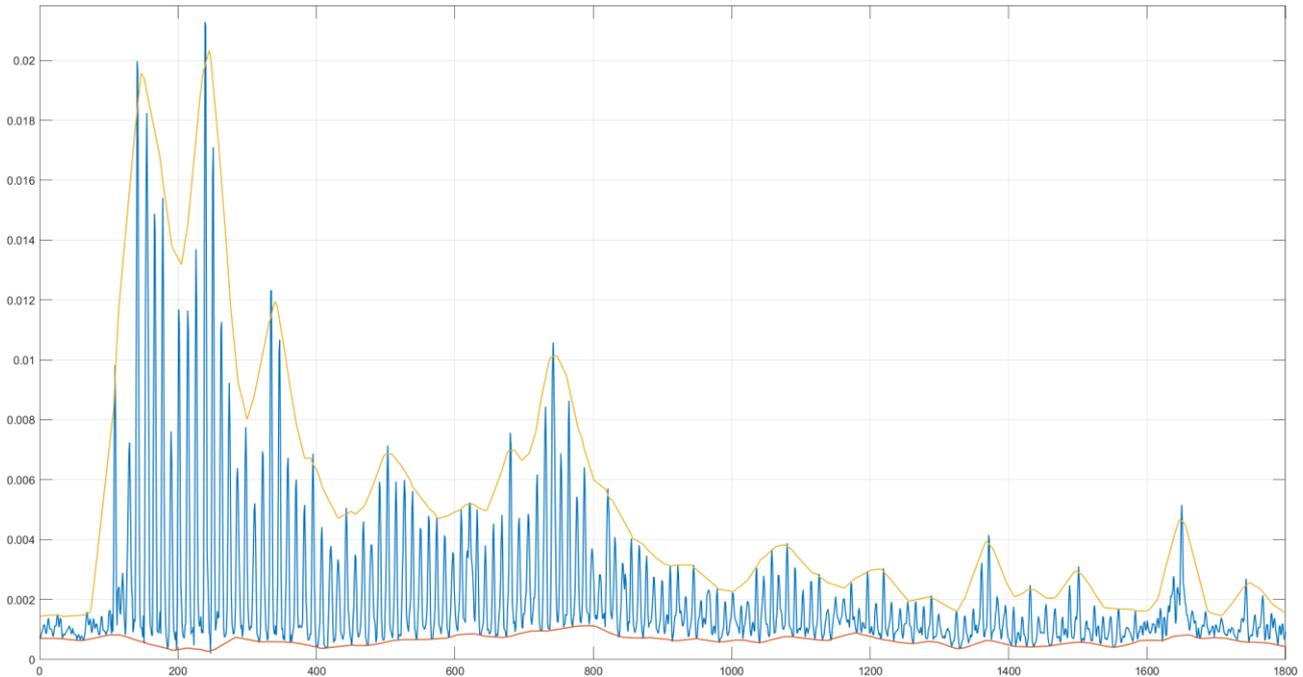


Рисунок 6 – Огинаюча сейсмічного сигналу кроку людини

В залежності від завадової обстановки та близькість усякого роду збудників повільних сейсмічних коливань в рамках одного вікна аналізу може виникати певний тренд в послідовності відліків.

Чутливість розглянутих алгоритмів до наявності тренду в сигналі викликана їх принципом роботи. В обох випадках поріг спрацювання обирається ітеративно, додаючи чи видаляючи значення з масиву та обчислюючи його середнє значення. У випадку алгоритму СМЕ наявність лінійного тренду в масиві значень, в більшості випадків, буде призводити до завищених значень порогового рівня. У випадку алгоритму FCME коли до початкових розрахунків обирається лише частина відліків (від 10 до 25%) початкове значення порогу буде меншим що призведе одразу до двох наслідків: по перше алгоритму потрібно буде зробити більше ітерацій для знахо-

дження необхідного порогового рівня, а по друге розрахований рівень в більшості випадків буде занижений а отже і точність роботи алгоритму також буде незадовільна.

Не менш істотно на результати виявлення сейсмічного збудження може впливати великий рівень перепаду амплітуди сигналів в часі.

Задля зменшення впливу від зміни амплітуди сигналу в часі необхідно провести нормування сигналу кожного кадру до певної встановленої величини. Нормування достатньо робити по амплітуді, визначивши максимальне значення в кадрі і про нормувавши відносно нього весь кадр.

Зменшення впливу тренду реалізується через визначення форми тренду яка в подальшому віднімається від сигналу але середній рівень тренду зберігається для усього сигналу, це

необхідно для збереження налаштувань для розрахунку порогового рівня (P_{FA}).

Результати роботи алгоритмів з урахуванням компенсації тренду та нормування амплітуди сигналу наведені нижче в таблиці 2.

Таблиця 2

	CME	FCME
Початковий сигнал		
Вірогідність хибних спрацювань	23 %	10 %
Компенсація тренду сигналу		
Вірогідність хибних спрацювань	16 %	7 %
Нормування амплітуди кадрів сигналу		
Вірогідність хибних спрацювань	0	0

ВИСНОВКИ

Тести показали що алгоритм CME при застосуванні в сейсмічних детекторах має занадто високу вірогідність хибних спрацювань в 23% що не дозволяє використовувати його без додаткових заходів по її мінімізації.

Вірогідність хибних спрацювань у 10% дозволяє використовувати алгоритм FCME на практиці, хоча і є бажаним вжити заходів по мінімізації вірогідності хибних спрацювань.

Попередня обробка сигналу перед застосуванням алгоритмів порогового детектування дозволяє істотно знизити вірогідність хибних спрацювань.

При наявності сильного тренду в сигналі його компенсація може істотно поліпшити результати детектування.

Найбільший вплив має нормування амплітуди кадрів сигналу, на тестовій вибірці це дозволило знизити вірогідність хибних спрацювань до нуля.

Алгоритм FCME є більш складним з точки зору через наявність сортування масиву перед початком розрахунку порогового значення.

В випадку автономного давача з обмеженою ємністю батареї та необхідністю забезпечення довгого функціонування більш прийнятним є алгоритм CME з застосуванням попереднього нормування амплітуди сигналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. (1955). *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 233(1192), 55–69. doi: [10.1098/rspa.1955.0245](https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0245)
2. Sushko, I. O., Vistyzenko, Y. V., Movchanyuk, A. V., Antypenko, R. V., & Serha, A. V. (2019). Geophone Equivalent Circuit for Simulation Tasks in SPICE Packages. *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 77, 53–59. doi: [10.20535/radap.2019.77.53-59](https://doi.org/10.20535/radap.2019.77.53-59)
3. Richman, M. S., Deadrick, D. S., Nation, R. J., & Whitney, S. (2001). Personnel tracking using seismic sensors. *Unattended Ground Sensor Technologies and Applications III*. doi: [10.1117/12.441276](https://doi.org/10.1117/12.441276)
4. Li, J., He, M., Cui, G., Wang, X., Wang, W., & Wang, J. (2020). A Novel Method of Seismic Signal Detection Using Waveform Features. *Applied Sciences*, 10(8), 2919. doi: [10.3390/app10082919](https://doi.org/10.3390/app10082919)
5. Vartiainen, J. (2010). *Concentrated signal extraction using consecutive mean excision algorithms* (Doctoral thesis). Retrieved from <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514263491.pdf>
6. Iwata, H., Umabayashi, K., Tiirro, S., Suzuki, Y., & Lehtomaki, J. J. (2016). A study on Welch FFT segment size selection method for spectrum awareness. *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. doi: [10.1109/wcncw.2016.7552708](https://doi.org/10.1109/wcncw.2016.7552708)
7. Vartiainen, J., Lehtomäki, J., Saarnisaari, H., & Juntti, M. (2010). Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010, 1–13. doi: [10.1155/2010/459623](https://doi.org/10.1155/2010/459623)